

ANALISIS KERUSAKAN DAN KEKUATAN TANGKI GFRP SLUDGE TANK PADA KILANG MINYAK SAWIT

Djoko Setyanto

Fakultas Teknik Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

Jalan Jenderal Sudirman 51 Jakarta (12930)

Email: djoko.setyanto@atmajaya.ac.id

Abstrak

Pertimbangan utama pemilihan tangki *glass fiber reinforced polymer* (GFRP) untuk tampungan fluida kimia adalah karakteristik material yang tahan terhadap korosi. Satu dari tiga unit tangki GFRP pemroses *sludge palm oil* pada industri kilang minyak sawit di Kalimantan Timur mengalami kebocoran setelah dua tahun kilang beroperasi. Struktur dinding bodi tangki terdiri dari lapisan penahan zat kimia dan lapisan struktur kekuatan. Lapisan penahan zat kimia terdiri dari *surfacing veil* dan tiga lapis penguat serat acak dengan matriks resin *bisphenol*. Lapisan struktur kekuatan terdiri dari penguat serat benang panjang yang digulung dengan matriks resin *isophthalic*. Makalah ini memaparkan analisis kerusakan dan tinjauan kekuatan struktur tangki yang hasilnya dijadikan dasar dalam pengambilan keputusan merekondisi ketiga unit tangki GFRP *sludge palm oil*. *Wrinkle* dan kantong resin di dekat permukaan bagian dalam tangki ketika kontak dengan fluida *sludge palm oil* bersuhu lebih dari 90 °C menyebabkan matriksnya menjadi keras dan getas. Gaya aliran sirkulasi fluida selanjutnya menyebabkan daerah cacat tersebut menjadi retak yang diikuti dengan pengelupasan seperti kulit jeruk, kawah kecil pada permukaan lapisan, dan porositas. Cacat kawah kecil pada permukaan lapisan dan porositas ini menjalar ke dalam lapisan yang lebih dalam ke arah dinding luar tangki menyebabkan kebocoran. Analisis kekuatan tangki berdasarkan standar ASTM D3299 menunjukkan bahwa tebal aktual dinding bodi dan dasar lebih rendah daripada yang dibutuhkan, masing-masing kurang satu dan lima belas milimeter. Akhirnya diputuskan bahwa rekondisi ketiga unit tangki dilakukan dengan cara penambahan lapisan *surfacing veil* dan lima lapis lamina berpenguat serat acak menggunakan matriks resin vinil ester yang dilapiskan pada permukaan dinding dalam dan dasar tangki. Tambahan lima lapis lagi diberikan pada bagian *knuckle*. Semua lapisan tersebut dikerjakan secara manual pekerjaan tangan.

Kata Kunci: *Tangki, Lapisan, Resin, Poliester, Vinil Ester, Minyak Sawit*

Abstract

The main consideration for choosing glass fiber reinforced polymer (GFRP) tank for chemical fluid vessel is the corrosion resistance property of the material. There are leakages on one of the three sludge palm oil GFRP tanks after two years operation in a palm oil refinery industry at East Borneo (Kalimantan Timur). The structure of the tank body consists of chemical barrier laminate and structural laminate. The chemical barrier laminate is composed of bisphenol as matrix with surfacing veil and three laminates chopped strand mat as reinforcement, while the structural laminate is made of isophthalic as matrix with filament winding as reinforcement. This paper discusses the failure and strength analysis of the tank structure and the results are used to make a decision for reconditioning the three GFRP sludge palm oil tanks. *Wrinkle* and resin pocket near the inner surface of the tank when exposed to sludge palm oil at temperature over than 90 °C caused the matrix to become hard and brittle. The flow circulation of the sludge palm oil in the tank caused crack on defect area, which then followed by orange peel, pinholes, and porosity defects. The pinholes and porosity defects spread to the deeper layers towards the outer wall and caused further leaking. Strength analysis of the tank based to ASTM D3299 showed that the actual body tank thickness and the actual knuckle thickness are less than the minimum one millimeter and fifteen millimeters requirement, respectively. Finally, reconditioning of the three GFRP sludge tanks were done by adding surfacing veil and five laminates of chopped strand mat layers with vinyl ester resin on the inside of the wall and the bottom. Moreover, the additional layers were given manually on the knuckle by hand lay-up method.

Key Words: *Tank, Laminate, Resin, Polyester, Vinyl Ester, Palm Oil*

1. Pendahuluan

Komposit matriks polimer (*polymer matrix composite*) berpenguat serat gelas atau komposit *glass fiber reinforced polymer* (GFRP) adalah material modern ekonomis yang dipilih karena memiliki karakteristik yang tidak dimiliki material konvensional logam baja dan paduannya atau logam lainnya. Karakteristik utama tersebut adalah sifatnya yang tahan terhadap lingkungan korosif, ringan, kuat dan kaku sesuai dengan disain pemilihan matriks polimer dan jenis serta orientasi serat penguatnya [1, 2]. Material tersebut sangat cocok digunakan sebagai tangki penampung atau tangki proses fluida korosif seperti asam sulfat, minyak sawit, atau fluida korosif lainnya [3].

Dua unit tangki GFRP terbesar di dunia berkapasitas 5000 m³ untuk penampung asam fosfat pada pabrik pupuk di Pelintung-Dumai telah diproduksi oleh satu perusahaan manufaktur komposit di Indonesia dengan performa yang baik sejak tahun 2007. Sebagaimana diketahui, asam fosfat adalah zat asam keras yang sangat korosif bagi material logam baja sehingga material GFRP lebih cocok dipilih ketimbang material logam. Diameter tangki 20 m dan tinggi 15,8 m menjadikan fabrikasi bodi dan penutup dilakukan di lapangan [4]. Demikian juga aplikasi tangki GFRP untuk berbagai ukuran mulai dari puluhan sampai ratusan meter kubik banyak dijumpai di berbagai perusahaan di Indonesia. Alasan utama kenapa dipilih material komposit GFRP adalah karena material tersebut tahan terhadap kontak dengan fluida yang korosif [3, 5].

Handoko [6] pernah melakukan investigasi atas adanya cacat visual tangki GFRP berdasarkan standar ASTM D2563 [7] pada proses pembuatan tangki di satu industri manufaktur di Tangerang. Empat jenis cacat ditemui, yakni adanya kerutan/ gelombang (*wrinkles*), kantong/ tumpukan resin (*resin pocket*), benda asing/ debu di dalam lapisan (*foreign inclusion*), dan daerah yang kurang terisi resin (*lack of fill out*). Cacat visual dan

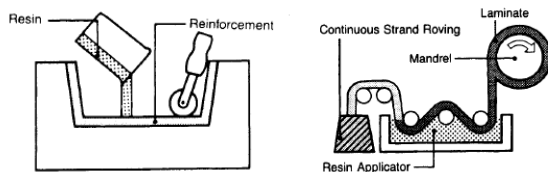
penanganannya menggambarkan ketat tidaknya prosedur produksi tangki GFRP sesuai dengan standar kualitas yang telah disepakati bersama antara pembeli dan pembuat. Kegagalan tangki dapat disebabkan oleh berbagai kemungkinan mulai dari salah disain akibat kurangnya informasi kondisi rancangan, proses produksi tangki yang tidak memenuhi standar, dan kemungkinan kesalahan saat pengoperasian tangki di lapangan [8].

Tangki GFRP dirancang dan diproduksi menurut standar yang disepakati bersama oleh perusahaan manufaktur pembuat dan konsumen pemakai dengan maksud agar tangki berfungsi secara baik dan aman serta berusia pakai lama. Jika ditemui adanya kegagalan/ kerusakan tangki GFRP setelah digunakan di lapangan perlu dilakukan investigasi apa penyebabnya dan bagaimana solusinya sehingga menjadi bahan pelajaran yang berharga dalam dunia industri manufaktur tangki GFRP agar kemungkinan terjadinya peristiwa serupa di kemudian hari dapat dicegah. Pabrik kilang minyak sawit di Provinsi Kalimantan Timur memiliki 11 unit tangki GFRP dengan tiga unit diantaranya adalah tangki GFRP *sludge tank*. Satu dari ketiga unit tangki mengalami kerusakan dindingnya bocor sehingga terjadi rembesan minyak sawit keluar dinding tangki. Di dalam makalah ini akan dipaparkan analisis kerusakan satu unit tangki GFRP *sludge tank* tersebut dan sekaligus evaluasi kekuatan struktur tangki berdasarkan standar ASTM D3299 sebagai dasar tindakan rekondisi yang akan dilakukan.

2. Kajian Teori dan Pustaka

Material dasar komposit GFRP untuk pembuatan tangki zat kimia terdiri dari penguat serat gelas tipe E (*E-glass*) dan matriks polimer/ resin termoset [2, 3, 5]. Serat *E-glass* dipilih karena harganya ekonomis dan karakteristik mekaniknya bagus dan kompatibel dengan berbagai jenis resin termoset [9, 10, 11]. Resin yang dipilih disesuaikan dengan kondisi zat kimia dan

suhu operasionalnya, biasanya dari jenis resin poliester, vinil ester, atau epoksi. Resin poliester terdiri dari beberapa jenis, yakni *orthophthalic*, *isophthalic*, *bisphenol* dan beberapa jenis khusus lainnya sesuai keperluan. Resin poliester *orthophthalic* didisain tahan terhadap air dan air laut dengan suhu operasional (*service temperature*) hingga 50 °C [3, 5]. Resin poliester *isophthalic* didisain tahan terhadap garam dan asam lemah dengan suhu operasional hingga 70 °C [3, 5]. Resin poliester *bisphenol* didisain tahan terhadap asam keras dan alkali dengan suhu operasional hingga 90 °C [3, 5]. Resin vinil ester didisain tahan terhadap asam keras dan alkali dengan suhu operasional hingga 140 °C [3, 5].



Gambar 1. Metode *contact molding* (a) dan *filament winding* (b) [12]

Pembuatan bodi tangki dapat dilakukan secara manual (*hand lay-up*) menggunakan cetakan (*contact molding*) dan dengan mesin penggulung (*winding machine*). Gambar 1 memperlihatkan kedua metode tersebut. Penutup tangki dan asesori lain seperti lubang orang dan flens saluran pipa biasanya dibuat secara manual dengan cetakan. Penyambungan antar bagian tangki dilakukan secara manual dengan laminasi [12]. Rancangan dan metode fabrikasi dilakukan menurut standar sesuai keinginan pembeli atau pihak manufaktur. Standar yang umum digunakan di Indonesia adalah standar *british* (BS) atau standar ASTM.

Standar BS 4994 [13] berisi panduan lengkap perancangan tangki GFRP mulai dari bodi, penutup (*cover*), flens, penyambungan, metode fabrikasi, inspeksi dan pengujian, serta *handling*. Standar ini dapat digunakan untuk tangki bertekanan atmosfer atau lebih tinggi daripada tekanan atmosfer. Tebal bodi dan tebal lapisan penyambung ditentukan berdasarkan kekuatan tarik dan geser setiap

lamina sehingga tebal akhir diperoleh berdasarkan jumlah lamina.

Standar ASTM D 3299 [14] berisi panduan perancangan bodi tangki GFRP bertekanan atmosfer. Tebal tangki dihitung terlebih dahulu berdasarkan kekuatan tarik material bodi tangki yang untuk selanjutnya diterjemahkan menjadi struktur lamina-lamina. Bagian dalam dinding tangki didisain sebagai lapisan pelindung zat kimia (*chemical barrier*). Komposisi lapisan ini terdiri dari lapisan tipis resin (*resin rich layer*), lapisan tissue (*surfacing veil*), dan dua sampai tiga lapis struktur berpenguat serat acak (*chopped strand mat*). Ukuran flens dan cara penyambungan diatur dalam standar tersendiri yang diatur secara terpisah.

3. Studi Kasus Tangki GFRP *Sludge Tank*

Tangki-tangki pemroses minyak sawit berjumlah 11 unit pada kilang minyak sawit di Provinsi Kalimantan Timur dipasang sejak 2012. Tiga dari 11 unit tangki tersebut adalah tangki *sludge tank* yang ukurannya masing-masing 45 m³. Setelah dua tahun beroperasi, satu dari tiga unit tangki *sludge tank* mengalami kerusakan. Kerusakan berupa rembesan bocor pada beberapa titik di bodi tangki seperti ditunjukkan lingkaran merah pada Gambar 2.



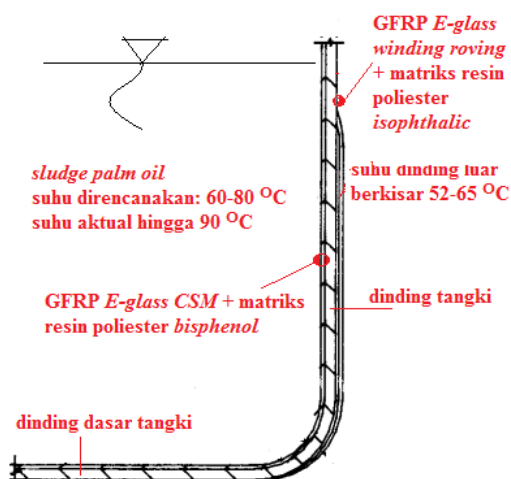
Gambar 2. Kebocoran tangki GFRP *sludge tank*

Data teknis tangki *sludge tank* yang berhasil dihimpun dan dicatat adalah sebagai berikut:

- Lokasi tangki: pabrik kilang sawit di Provinsi Kalimantan Timur.

- Jumlah tangki *sludge tank*: 3 unit, satu unit mengalami kebocoran.
- Jenis tangki: vertikal.
- Tekanan: atmosfer (ada ventilasi).
- Volume: 45 m³.
- Diameter dalam tangki: 3 m.
- Panjang silinder tangki: 6,7 m.
- Dasar tangki (*bottom cover*): datar.
- Tutup tangki (*top cover*): rata
- Fluida: *sludge palm oil*, massa jenis spesifik $\gamma = 0.95$ dan PH = 4 – 5.
- Suhu operasional direncanakan: 60-80 °C, namun pengukuran di lapangan suhu fluida *sludge palm oil* mencapai 90 °C atau lebih.
- Suhu bodi tangki hasil pengukuran di lapangan: 52 °C, 59 °C, 68 °C, dan 65 °C.
- Kekerasan Barcol dinding dalam: 60
- Kekerasan Barcol dinding luar: 55
- Tebal bodi tangki: 8,5 mm.
- Struktur bodi tangki disusun dari lapisan *chemical barrier* 3,5 mm yang terdiri dari 0,5 mm lapisan kaya resin dan *surfacing veil* dengan resin *bisphenol*, lapisan tambahan *chemical barrier* sekaligus berfungsi sebagai lapisan struktur tebal 3 mm dari tiga lapis CSM 0,45 kg/m² dengan resin *bisphenol*, dan lapisan struktur tebal 5 mm dari *filament winding* dengan resin *isophthalic*.
- Tebal tutup atas (*top cover*) 9 mm.
- Tebal dasar tangki (*bottom cover*) 11 mm.
- Tebal belokan (*knuckle*): 8 mm.

3.1. Analisis Kerusakan Tangki



Gambar 3. Gambar potongan tangki (tanpa skala) [14]

Tangki GFRP *sludge tank* yang mengalami kebocoran tersebut oleh manajemen perusahaan hanya boleh diinvestigasi di lapangan melalui pengamatan, karakterisasi, dan pengujian yang tidak merusak (*non-destructive testing*).

Gambar 3 adalah gambar potongan tangki GFRP *sludge tank*. Struktur dinding tangki bagian dalam dengan tebal 3,5 mm dimaksudkan sebagai lapisan *chemical barrier* dengan resin poliester *bisphenol* yang terdiri dari 0,5 mm lapisan kaya resin dan *surfacing veil* dan tiga lapis berpenguat serat acak CSM 0,45 kg/m². Struktur dinding tangki bagian luar tebal 5 mm disusun dari serat penguat *E-glass* orientasi searah benang panjang yang digulung (*winding*) dengan matriks resin poliester *isophthalic*. Kombinasi struktur tersebut dimaksudkan untuk menekan harga, karena resin poliester *isophthalic* harganya lebih murah daripada *bisphenol*. Komposisi struktur dinding tangki tersebut dari sisi pertimbangan teknik dapat diterima dan sudah memenuhi kebutuhan. Pertimbangannya adalah fluida *sludge palm oil* adalah termasuk fluida korosif (PH = 4-5) dan suhu fluida yang direncanakan adalah 60-80 °C. Berdasarkan pertimbangan jenis fluida dan suhu operasional, maka pemilihan resin poliester *bisphenol* yang digunakan sebagai matriks lapisan *chemical barrier* untuk melindungi lapisan struktur yang dari resin *isophthalic* sudah memenuhi syarat. Sebagaimana diketahui poliester *bisphenol* berdasarkan literatur [3, 5] dan daftar *corrosion guide* [15] mampu dan tahan terhadap *chemical attack* fluida *palm oil* yang memiliki PH 4-5 serta kemampuan resin tersebut menahan suhu operasional hingga 90 °C. Sementara itu permukaan dinding bagian luar suhunya lebih rendah daripada suhu permukaan dinding bagian

dalam. Tercatat bahwa suhu dinding bagian luar bervariasi 52-65 °C, sehingga suhu struktur antara dinding dalam dan luar diperkirakan berkisar antara 55-70 °C asalkan suhu maksimum *sludge palm oil* 80 °C. Suhu operasional inipun masih dalam rentang suhu operasional yang diijinkan untuk jenis resin poliester *isophthalic* [3, 5, 15]. Bahasan ini menunjukkan bahwa pemilihan jenis resin, yakni paduan antara *bisphenol* dan *isophthalic* dapat diterima dari sisi pertimbangan ekonomis dan sekaligus pertimbangan teknik dengan catatan suhu operasional *sludge palm oil* tidak melebihi 80 °C.

Masalah yang terjadi adalah adanya fakta bahwa suhu operasional *sludge palm oil* ternyata dapat melebihi 80 °C yang menurut catatan dapat terjadi hingga 90 °C dan bahkan lebih tinggi. Suhu 90 °C adalah batas maksimum suhu operasional resin *bisphenol* [3, 5, 15]. Sementara itu suhu struktur antara dinding dalam dan luar juga akan mengalami kenaikan suhu yang diperkirakan dalam kisaran 60-75 °C yang berarti sudah melebihi batas atas suhu operasional resin *isophthalic* [3, 5, 15]. Matriks resin poliester *bisphenol* dan *isophthalic* yang dikondisikan melayani suhu 90 °C atau lebih dan 70 °C atau lebih berarti matriks tersebut sudah mulai memasuki daerah suhu yang menuju ke arah suhu distorsi panas (HDT, *heat distortion temperature*). Suhu HDT resin poliester adalah 200-260 °C [16]. Walaupun suhu operasional yang disebutkan tadi masih jauh dari batasan suhu HDT, namun kekuatan material (tarik, lentur, dan geser) tidaklah setinggi kekuatan material pada suhu operasional. Suhu operasional yang lebih tinggi (*overheat*) daripada suhu maksimum yang direkomendasikan dapat menyebabkan elastisitas dan kekuatan geser antara matriks dengan serat penguat menurun. Kekerasan matriks komposit meningkat namun kekuatan

tarik dan modulus elastisitasnya menurun. Sifat material menuju ke sifat getas (*brittle*). Suhu yang lebih tinggi daripada suhu operasional secara visual menyebabkan warna material GFRP mengalami perubahan dari semula berwarna natural yang bersifat tembus cahaya (*translucent*) menjadi lebih menguning dan gelap. Peristiwa perubahan warna ini mirip dengan peristiwa pelapukan (*aging*) oleh UV yang terkandung dalam spektrum cahaya matahari. Jika UV menyebabkan putus rantai ester yang menyebabkan kekerasan material meningkat namun diiringi dengan degradasi kekuatan dan elastisitas serta sifat getas, maka suhu *overheat* juga menunjukkan gejala yang mirip yakni kekerasan yang meningkat diiringi dengan sifat getas. Kekerasan Barcol dinding tangki bagian dalam 60 dan dinding luar 55 menunjukkan adanya peningkatan kekerasan. Kekerasan Barcol pada saat material selesai diproduksi berkisar 40-50 [16]. Sifat keras dan getas terutama pada permukaan dinding bagian dalam ini menjadi penyebab bocornya tangki.



Gambar 4. Permukaan dinding dalam (a) dan luar (b)



Gambar 5. Cacat *wrinkle* (a) dan *resin pocket* (b)

Gambar 4 memperlihatkan permukaan dinding bagian dalam (a) dan luar (b) tangki GFRP *sludge tank* yang mengalami kebocoran, sedangkan Gambar 5 adalah hasil

investigasi cacat visual tangki berupa *wrinkle* dan kantong resin dalam kasus yang lain [6]. Kejadian cacat *wrinkle* dan kantong resin yang berupa rongga udara (*voids*) menjadi penyebab timbulnya cacat. Lapisan matriks di atas gelembung udara dan telah mengalami pengerasan namun getas karena suhu *overheat* oleh pengaruh gerakan aliran sirkulasi fluida di dalam tangki menyebabkan retaknya area seperti ditunjukkan Gambar 5 (a) dan (b) menjadi area seperti ditunjukkan Gambar 4 (a). Lapisan yang retak (*crack*) tersebut diikuti dengan permukaan mengelupas seperti kulit jeruk (*orange peel*), kawah kecil pada permukaan lapisan (*pinhole*), dan lubang kecil-kecil yang menyerupai lubang jarum/ porositas (*porosity*). Cacat-cacat yang terjadi pada lapisan penahan zat kimia tersebut tersebut merembet ke lapisan yang lebih dalam lagi menuju dinding luar karena terjadinya *debonding* antara matriks dengan serat penguat pada bagian lapisan yang mengandung cacat *wrinkle* dan kantong resin sehingga akhirnya terjadilah kebocoran seperti yang diperlihatkan Gambar 4 (b).

Berdasarkan peristiwa tersebut, solusi untuk melakukan rekondisi tangki adalah dengan penambahan lapisan baru beberapa lamina GFRP sebagai lapisan penahan zat kimia (*chemical barrier*) menggunakan serat acak CSM yang lebih banyak menyerap resin yang basis matriksnya memiliki ketahanan suhu operasional yang lebih tinggi, dalam hal ini adalah resin vinil ester. Resin vinil ester memiliki ketahanan suhu operasional hingga 140 °C [3, 5] sehingga aman terhadap suhu *sludge palm oil* yang dapat mencapai 90 °C atau bahkan lebih. Tambahan lamina baru yang akan dibahas dalam bab 3.2 nanti selain berfungsi untuk mengatasi kebocoran juga berfungsi sebagai lapisan GFRP yang tahan terhadap suhu operasional lebih tinggi dari disain semula (> 80 °C) dan sekaligus resin yang tahan terhadap *chemical attach* fluida korosif termasuk minyak sawit.

3.2. Analisis Kekuatan Struktur Tangki

Analisis kekuatan struktur tangki yang dijadikan dasar penghitungan tambahan lamina bodi dan dasar tangki didasarkan pada standar ASTM D3299 [14]. Asumsi karakteristik material GFRP didasarkan pada aplikasi material pada suhu operasional (*service temperature*), yakni:

- Kekuatan tarik arah melingkar, $S_h = 25500$ psi
- Kekuatan tarik arah aksial, $S_a = 8100$ psi
- Modulus tarik arah melingkar, $E_h = 2,6 \times 10^6$ psi
- Modulus tarik arah aksial, $E_h = 8,1 \times 10^5$ psi
- Modulus tarik efektif, $E_{eff} = 1,4 \times 10^6$ psi
- Faktor disain, $F_1 = 10$

3.2.1. Perhitungan tebal dinding bodi tangki

Keterangan:

T : tebal dinding bodi tangki

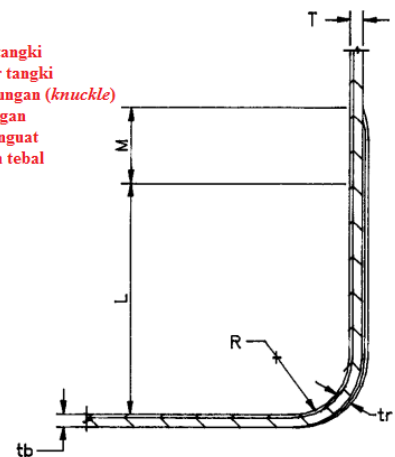
t_b : tebal dinding dasar tangki

t_r : tebal bagian lengkungan (*knuckle*)

R : jari-jari kelengkungan

L : panjang lapisan penguat

M: panjang perubahan tebal



Gambar 6. Gambar potongan bodi dan tutup dasar tangki (tanpa skala) [14]

- Diameter tangki, $D = 120$ in
- Tinggi tangki, $H = 268$ in
- Tekanan hidrostatik fluida, $p = 0,036 \gamma H$, psi
 $P = (0,036) \times (0,95) \times (268) = 9,171$ psi
- Tebal dinding bodi tangki berbasis gaya arah melingkar,
 $t_h = (p \times D) / (2 S_h / F_1)$
 $= (9,171 \times 120) / (2 \times 25500 / 10)$
 $= 0,22$ in = 5,6 mm.
- Posisi tangki di dalam bangunan dan terlindung dari pengaruh gaya angin, sehingga momen lentur oleh gaya angin dapat diabaikan.

- Tebal total dinding bodi tangki setelah ditambah 3,5 mm lapisan *chemical barrier* (0,5 mm lapisan *surfacing veil* dan 3 lamina CSM 450 g/m² setebal 3 mm) adalah $t = t_h + 3,5 = 5,6 + 3,5 = 9,1$ mm.
- Saat ini tebal total tangki adalah 8,5 mm, sehingga masih ada kekurangan tebal struktur bodi tangki sebesar $9,1 - 8,5 = 0,6$ mm atau dibulatkan 1 mm.
- Struktur lapisan *chemical barrier* yang lama sudah mengalami degradasi bahkan ada yang sudah bocor, maka tambahan lamina baru harus menggunakan resin yang tahan terhadap suhu yang lebih tinggi. Resin vinil ester yang memiliki ketahanan suhu operasional hingga 140 °C dan tahan terhadap fluida minyak sawit dengan suhu > 80 °C menjadi pilihan [3, 5]. Jumlah minimum tebal yang ditambahkan di dalam dinding tangki bagian dalam yang berfungsi sebagai struktur *chemical barrier* minimum adalah 3,5 mm atau 3 lamina dan *surfacing veil*.
- Untuk menjamin kekuatan struktur bodi tangki yang baru, maka tambahan lamina struktur sebanyak 5 lamina yang dilapiskan di bagian dalam bodi tangki tentunya memenuhi syarat baik sebagai lapisan *chemical barrier* maupun sebagai tambahan kekuatan struktur. Tebal total bodi tangki setelah direkondisi minimum adalah $8,5 \text{ mm} + 3 \text{ mm} = 11,5 \text{ mm}$.

3.2.2. Perhitungan tebal dinding dasar tangki

Tebal minimum dinding dasar tangki yang ditumpu rata secara penuh dalam arah horisontal menurut standar adalah tipe II adalah 0,37 in atau 9,4 mm [14]. Tebal aktual adalah 11 mm, sehingga sudah memenuhi syarat kekuatan struktur.

Sementara itu tebal lapisan penyambung antara bodi dengan dasar tangki (*knuckle*) merupakan kombinasi atau jumlah tebal dasar dan bodi tangki, sehingga tebal minimumnya adalah $11 \text{ mm} + 11,5 \text{ mm} = 22,5 \text{ mm}$. Tebal aktual *knuckle* saat ini adalah 8 mm, sehingga perlu ditambah 14,5 mm atau dibulatkan 15 mm.

Berdasarkan uraian penyebab kerusakan dan tinjauan kekuatan struktur tangki tersebut, maka langkah rekondisi perbaikan semua tiga unit tangki GFRP *sludge tank* diputuskan adanya tambahan lamina baru baik pada dinding bodi maupun dinding dasar di bagian dalam menggunakan lapisan penahan zat kimia (*surfacing veil*) dan lima lamina *E-glass* 450 g/m² CSM dengan matriks vinil ester. Sementara itu di bagian *knuckle* selain lima lapis tersebut akan ditambahkan lagi 10 lamina untuk melengkapi jumlah tebal 15 mm. Proses pengerjaan lamina baru dilakukan secara manual seperti yang ditunjukkan Gambar 1 (a). Hasil rekondisi ketiga tangki diperlihatkan Gambar 6.



Gambar 6. Hasil rekondisi tiga unit tangki

4. Simpulan

Berdasarkan analisis kerusakan dan tinjauan kekuatan struktur tangki GFRP *sludge tank* tersebut, disimpulkan:

- 1) Kebocoran dinding tangki disebabkan oleh suhu operasional fluida *sludge palm oil* yang melebihi disain rancangan hingga 90 °C atau lebih. Dinding bagian dalam tangki sebagai lapisan *chemical barrier* dari matriks resin poliester *bisphenol* mengalami degradasi kekerasannya meningkat namun bersifat getas. Lapisan permukaan yang mengandung cacat *wrinkle* dan kantong

resin oleh gaya gerak sirkulasi fluida akhirnya mengalami retak yang diikuti dengan permukaan mengelupas seperti kulit jeruk, kawah kecil pada permukaan lapisan, dan lubang kecil-kecil/ porositas yang menyerupai lubang jarum. Cacat-cacat pada lapisan penahan zat kimia tersebut merembet ke lapisan struktur menuju dinding luar tangki yang menyebabkan kebocoran.

- 2) Kekuatan struktur bodi tangki dan bagian lengkungan sambungan antara bodi dengan dasar (*knuckle*) menurut standar ASTM D3299 masih belum memenuhi syarat kekuatan. Penambahan kekuatan struktur yang dilakukan sekaligus berfungsi sebagai tindakan rekondisi tangki terhadap kebocoran.
- 3) Ketiga unit tangki wajib direkondisi dengan penambahan lapisan baru di bagian dalam dinding dan dasar tangki secara manual pekerjaan tangan. Tambahan lapisan baru tersebut adalah *surfacing veil* dan lima lamina E-glass CSM 450 g/m² dengan matriks resin vinil ester. Tambahan sepuluh lamina lagi diberikan pada lapisan *knuckle*.

DAFTAR PUSTAKA

1. Jamasri (2008), Prospek pengembangan komposit serat alam di Indonesia, Pidato pengukuhan jabatan guru besar pada Fakultas Teknik UGM, Yogyakarta.
2. Farahani, A.P. (2010), Composite Materials: Characterization, Fabrication and Application-Research Challenges and Directions, Journal Appl. Composites Materials 17, Springer-Verlag, pp. 63–67.
3. Cheremisinoff, N.P. dan P.N. Cheremisinoff (1995), Fiberglass Reinforced plastics, Noyes Publications, New Jersey, 1995.
4. Reinforced plastics (2006), volume 50 number 10, Elsevier Ltd., UK, November 2006, www.reinforcedplastic.com/view/1119
5. Goodman, S.H. (1998), *Handbook of thermoset plastics*, 2nd ed., Noyes Publication, New Jersey, USA, Chp 4.
6. Handoko, Y. (2004), Analisis cacat pada tangki FRP, Tugas Akhir Prodi Teknik Mesin FT Unika Atma Jaya, Jakarta.
7. ASTM D 2563 (1994), Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts, ASTM International, USA.
8. Setyanto, D. dan I. Iskandar (2009), Analisis kegagalan tangki kimia fiberglass 50 meter kubik, Seminar Nasional Kluster Riset Teknik Mesin 2009, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
9. Mortensen, A. (2007), Concise encyclopedia of composite materials, second ed., Elsevier, Nederland.
10. Cardarelli, F. (2008), Materials handbook : a concise desktop reference, 2nd ed., Springer-Verlag, London.
11. Wallenberger, F.T. dan P.A. Bingham (2010), Fiberglass and glass technology :Energy-friendly compositions and applications, Springer, New York.
12. Berins, M.L. (2000), *Plastics engineering handbook*, 5rd ed., Kluwer academic publishers group, Massachusetts, USA.
13. BS 4994 (1987), British standard specification for design and construction of vessels and tanks in reinforced plastics, British Standards Institution, UK.
14. ASTM D3299 (2000), Standard specification for filament-wound glass-fiber-reinforced thermoset resin corrosion-resistance tanks, ASTM International, USA.
15. Justus Sakti Raya Corporation (2009), Technical Information of Corrosion Guide PT Justus Sakti Raya Corporation, Jakarta.
16. Fibrealum (2015), www.fibrealum.com diakses 20 September 2014.